

徐蒙, 管兆勇, 蔡倩. 1960—2015年中国冬半年极端降温过程事件的时空演变特征. 气象科学, 2020, 40(6): 733-743.

XU Meng, GUAN Zhaoyong, CAI Qian. Spatial and temporal evolution features of cooling extremes in China during winter half year from 1960 to 2015. Journal of the Meteorological Sciences, 2020, 40(6): 733-743.

# 1960—2015年中国冬半年极端降温过程事件的时空演变特征

徐蒙 管兆勇 蔡倩

(南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/  
气象灾害预报预警与评估协同创新中心 南京 210044)

**摘要** 利用1960—2015年中国2 474个站点的逐日最低气温资料,采用REOF方法将中国分为7个区域,通过对每个区域内所有站点降温阈值进行平均,得到了7个降温阈值。当某区域内测站单日降温幅度超过区域平均阈值时,认为该测站发生一次极端降温事件。7个区域降温平均阈值各异,总体呈北大南小特征,最大降温 $-10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最小 $-7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据上述定义,研究了中国冬半年极端降温过程事件的时空演变特征。结果表明:极端降温事件发生频数呈北多南少的空间分布。北部地区存在多个频发中心,在 $42^{\circ}\text{N}$ 和 $35^{\circ}\text{N}$ 附近存在两个高频发生带。南部地区频数呈一定的带状分布,在 $25^{\circ}\text{N}$ 附近发生该事件的频率亦高于南部其他地区。近56 a来,极端降温事件频数变化总体呈减少趋势,前期较明显,中后期趋于稳定。各年代频数的空间分布基本一致,但前期总体表现为北部增多。而在1990s则转变为南负北正的空间分布,后期中部及沿海地区发生了趋势符号的年代际改变。进一步分析表明,各区域极端降温频数突变的年份均不一致且突变前后的频数存在较大差异。这些结果可为深刻认识极端低温事件的变化规律和气候预测提供线索。

**关键词** 极端降温过程; 时空特征; 冬半年; 中国

分类号: P468.021

doi: 10.3969/2020jms.0015

文献标识码: A

## Spatial and temporal evolution features of cooling extremes in China during winter half year from 1960 to 2015

XU Meng GUAN Zhaoyong CAI Qian

(Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME) / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (IL-CEC) / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract** Based on the daily minimum temperature of 2 474 stations in China from 1960 to 2015, seven climatic regions were divided by REOF method. Regional averages of the thresholds of cooling extent of temperature over seven regions, seven cooling thresholds were obtained. The average temperature thresholds of the seven regions are different and get smaller from north to south, with a maximum decrease of  $10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  and a minimum of  $7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The Cooling Extremes (CE) were defined and the temporal and spatial features of extreme cooling events in winter half year were studied. The results show that there is a significant spatial difference in occurrences of cooling extremes in the half year of winter, presenting a spatial pattern of occurrences with more occurrences in the north whereas less

收稿日期(Received): 2019-07-16; 修改稿日期(Revised): 2020-02-09

基金项目: 国家重点研究项目(41975073); 江苏省优势学科建设项目(PAPD)

通信作者(Corresponding author): 管兆勇(GUAN Zhaoyong). guanzy@nuist.edu.cn

occurrences in the south. There are multiple centers with high frequency in the northern and two high-frequency zones around  $42^{\circ}\text{N}$  and  $35^{\circ}\text{N}$ . The occurrence frequency near  $25^{\circ}\text{N}$  is higher than in other parts of the south. Over the past 56 years, the CE frequency has a decreasing trend, which is more clearly seen in the earlier period. The spatial distribution of frequencies in each decade looks similar to each other. The abrupt changes in frequency of CE events are not uniform in spatial. In some regions, the time when the abrupt changes occur is earlier but in other regions later. These results can provide clues for deep understanding of the law of extreme low temperature events and climate prediction.

**Key words** cooling extremes; spatial and temporal features; winter half year; China

## 引言

根据 IPCC 报告的定义<sup>[1]</sup>,极端天气气候事件是指某一地点或地区不常或极少发生的天气气候事件。在我国,此类事件主要包括暴雨、洪涝、干旱、高温、低温、台风等。近年来,极端天气气候事件发生频率显著增加,且发生区域范围扩大<sup>[2-3]</sup>,引发极大关注。对极端天气气候事件的变化进行研究有着重要的科学意义和实际意义。

观测表明,近年来全球平均地表温度升高趋势明显,但极端低温事件却频发,影响范围广,持续时间长。2005 年以来,我国区域性极端低温事件发生频率显著增加,如:2008/2009 年我国南方地区冬季大范围低温雨雪天气<sup>[4-6]</sup>;2009 年东北北部的夏季低温事件<sup>[7]</sup>;2010/2011 年冬季全国范围内的区域性极端低温事件<sup>[8]</sup>。国内外学者就极端气温事件开展了大量研究<sup>[9-12]</sup>,研究表明极端低温事件主要由极端降温过程引起,总体受全球变暖的影响,且发生频率呈增加趋势。对极端事件的定义存在不同的方法。阈值选取早期主要采取绝对阈值法<sup>[13]</sup>,潘晓华等<sup>[14]</sup>和翟盘茂等<sup>[15]</sup>提出了定义极端值、阈值的新方法,即采用某个百分位值作为极端值的阈值,超过这个阈值则被认为是极值,该事件可看作极端事件;任福民等<sup>[16]</sup>在此基础上提出了区域性极端低温事件客观识别方法;况雪源等<sup>[17]</sup>则提出了一种简化的识别群发性气候事件方法;龚志强等<sup>[18]</sup>的研究则进一步确定了发生该类事件的空间分布和持续时间。

我国的极端低温事件存在明显的区域性特征<sup>[19-21]</sup>,极端低温频数主要有两种模态<sup>[22]</sup>:全区一致变化型和南北反相变化型,极端气温的变化趋势亦存在类似特征<sup>[23]</sup>。其中,区域性极端低温事件最低气温和几何中心纬度的发生频次均为双峰特征分布,在  $30^{\circ}\text{N}$  和  $42^{\circ}\text{N}$  存在两个大值带<sup>[8]</sup>。我国冬季极端低温发生频次存在明显的年代际变化特

征<sup>[15 24-25]</sup>,极端气温事件发生频率总体呈 10 a 左右的年代际振荡。北方地区极端低温频数及强度的年际、年代际变化显著程度相似,而南方地区以年际变化为主。近五十多年以来,全国冬半年极端低温频数变化呈减少趋势,1980s 前后明显突变<sup>[24]</sup>,突变前期低温频发,后期低温少发,1990 年以后,其减少趋势减缓,发生强度和影响范围减小,频数变化趋于稳定<sup>[8]</sup>。

极端低温事件中,寒潮因其影响范围广,持续时间长,致灾能力强等广受关注。关于寒潮的定义,针对不同区域,研究者使用了不同定义<sup>[26]</sup>。我国大陆地区普遍采用的是过程降温  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ ,且温度距平  $\leq -5^{\circ}\text{C}$ (温度距平指冷空气影响过程中日最低平均气温与该日所在旬的多年旬平均气温之差)<sup>[27]</sup>。寒潮在每年 9 月至次年 5 月均可能发生,但主要出现在 10 月至次年 3 月<sup>[28]</sup>。在全球变暖的背景下,寒潮发生的频率和强度也受到明显的影响<sup>[27 29]</sup>。我国寒潮呈由南向北逐渐减少的趋势<sup>[30]</sup>,且北方存在新疆北部、河套和东北地区 3 个多发区。近五十多年以来,我国寒潮总体呈减少趋势,但不同区域寒潮频次减少和强度减弱趋势存在差异<sup>[29-30]</sup>。

综上所述,除了寒潮事件外,以往关于极端低温的研究多以低气温本身为研究对象。众所周知,极端低温事件的形成与降温过程有关,但目前对极端降温过程或降温速率的研究甚少。因此本文使用 1960—2016 年 10 月至次年 3 月的我国大陆 2 474 个站点的逐日最低气温资料,首先定义极端降温过程事件,而后根据此定义所得结果进一步分析,揭示其时空变化特征。这一研究将探究气候变化规律并为防灾减灾决策提供科学线索。

## 1 资料与方法

采用中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)提供的中国大陆 2 474 个站点的

逐日最低气温资料,研究时段为 1960—2016 年,共 56 个冬半年(将当年 10 月至次年 3 月定义为一个冬半年),经筛选后选取 2 425 个无缺测站点资料,该资料经过严格的质量控制和均一化订正处理,并充分考虑测站迁移、仪器更换、观测站周边环境改变等不同情况,故能更真实地反映出气候变化的自然趋势。

采用经验正交分解函数(Empirical Orthogonal Decomposition, EOF)<sup>[31]</sup>和旋转经验正交分解函数(Rotated EOF, REOF)分析<sup>[32]</sup>等统计分析方法以及 North 方法<sup>[33]</sup>对特征性进行检验。利用 Mann-Kendall 检验方法<sup>[34]</sup>对本文定义所获得的逐年极端降温频数进行突变检验。若  $UF$  或  $UB$  的值大于 0,则表明序列呈上升趋势,若小于 0 则表明呈下降趋势;当它们通过临界直线时,表明趋势明显。若  $UF$  和  $UB$  两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的的时间即为突变开始时间。本文选取显著性水平  $\alpha=0.1$ 。

## 2 冬半年平均最低气温年际变化的区域分布型

为研究冬半年极端降温过程事件的统计特征,首先需要确定我国大陆范围内是否存在气候年际变化的不同区域,也就是不同的分布型或分区域。为此对 1960—2015 年日最低气温  $T_{\min}$  的冬半年平均进行了 REOF 分析。REOF 前 15 个模态对冬半年平均气温的总方差贡献率达 79.92%。选取 7 种主要 REOF 模态用于分区,它们对冬半年平均气温的总方差贡献达 49.16%(表 1)。图 1 为我国大陆 7 个主要 REOF 模态的时间系数序列与冬半年日平均最低气温的相关,可见均出现高相关中心,表明冬半年日平均最低气温变化呈明显的区域性分布。

表 1 中国冬半年平均的日最低气温总方差的区域名称及对应的 REOF 分量贡献率

Table 1 Sub-regions identified on the basis of contribution rate of the REOF modes to total variance of daily minimum temperature in China during the winter half year of 1960-2015

分区	对应 REOF 模态	方差贡献/ %	累计方差贡献/ %	范围	区域描述
Sub-region 1	REOF1	17.54	17.54	(31°~40°N, 115°~122.5°E)	华东
Sub-region 2	REOF2	9.44	26.98	(40°~43°N, 95.5°~115°E); (35°~40°N, 104°~115°E)	华北; 西北
Sub-region 3	REOF3	6.04	33.02	(40°~50°N, 80°~95.5°E)	新疆北部
Sub-region 4	REOF4	5.78	38.8	(27.5°~31°N, 114°~122.5°E); (25°~27.5°N, 114°~120.5°E)	华东南部; 华南东部
Sub-region 5	REOF5	5.28	44.08	(21°~25°N, 110°~119°E)	华中南部
Sub-region 6	REOF6	2.80	46.88	(25°~30°N, 104°~114°E); (27.5°~40°N, 75°~104°E)	高原; 新疆南部
Sub-region 7	REOF7	2.28	49.16	(40°~43°N, 115°~131°E); (43°~50°N, 115°~135°E)	东北; 华北东部

根据 REOF 模态和图 1a—g,确定了 7 个区域,其范围见表 1 和图 1h。为检验这 7 个区域划分是否合理,计算这 7 个区域上平均气温  $T_{\min}$  分别与 R1—R7 的相关系数(表 2),发现均在 0.7 左右,这表明:冬半年平均气温近 50%的局地变化可以用相应的 REOF 模态解释。由此可知,我国日最低气温变化的局地性特征可主要由 7 个 REOF 模态描述,且气温的相关性在 7 个区域内相互独立。由于极端天气气候事件可被看成在年际甚至年代际时间尺度上发生,故这里给出的 7 个区域可用于极端低温事件和降温过程事件分析的区域背景。

## 3 极端降温过程阈值的确定

对不同站点极端降温阈值的确定则可采用百分位定义法,即首先将某一站点后一日最低气温  $T_{\min}^{i+1}$  与当日的最低气温  $T_{\min}^i$  相减得到  $T_i$ ,即  $T_i = T_{\min}^{i+1} - T_{\min}^i$ ,若  $T_i < 0$  则认为发生一次降温事件。将某一站点 56 个冬季所有  $T_i$  按降序排列,选取第 99 个百分位值  $T_c$ (不同站点极端降温阈值)将其定义为该测站发生一次极端降温事件的阈值,不同站  $T_c$  可能不同。为方便,下文称极端降温过程事件为极端降温事件。

由于我国地域广袤,地形复杂,若对全国所有站点的降温阈值进行平均得到的绝对阈值进行分析会忽略某些区域发生该事件的频率差异;若每个站点采取不同的阈值,因为百分位法的特性,各站点发生该事件的频数则无差异。同时,考虑到极端降温事件本质上与极端低温有着密切的联系,因而为便于研究,这里结合上述对我国冬半年平均气温的分区,大致可按图 1h 将我国分为 7 个区域。通过对每个区域内所有站点的阈值进行平均,得到 7 个降温阈值(表 3)。认为当某区域内测站 1 d 的降温幅度超过区域平均阈值,则该测站发生一次极端

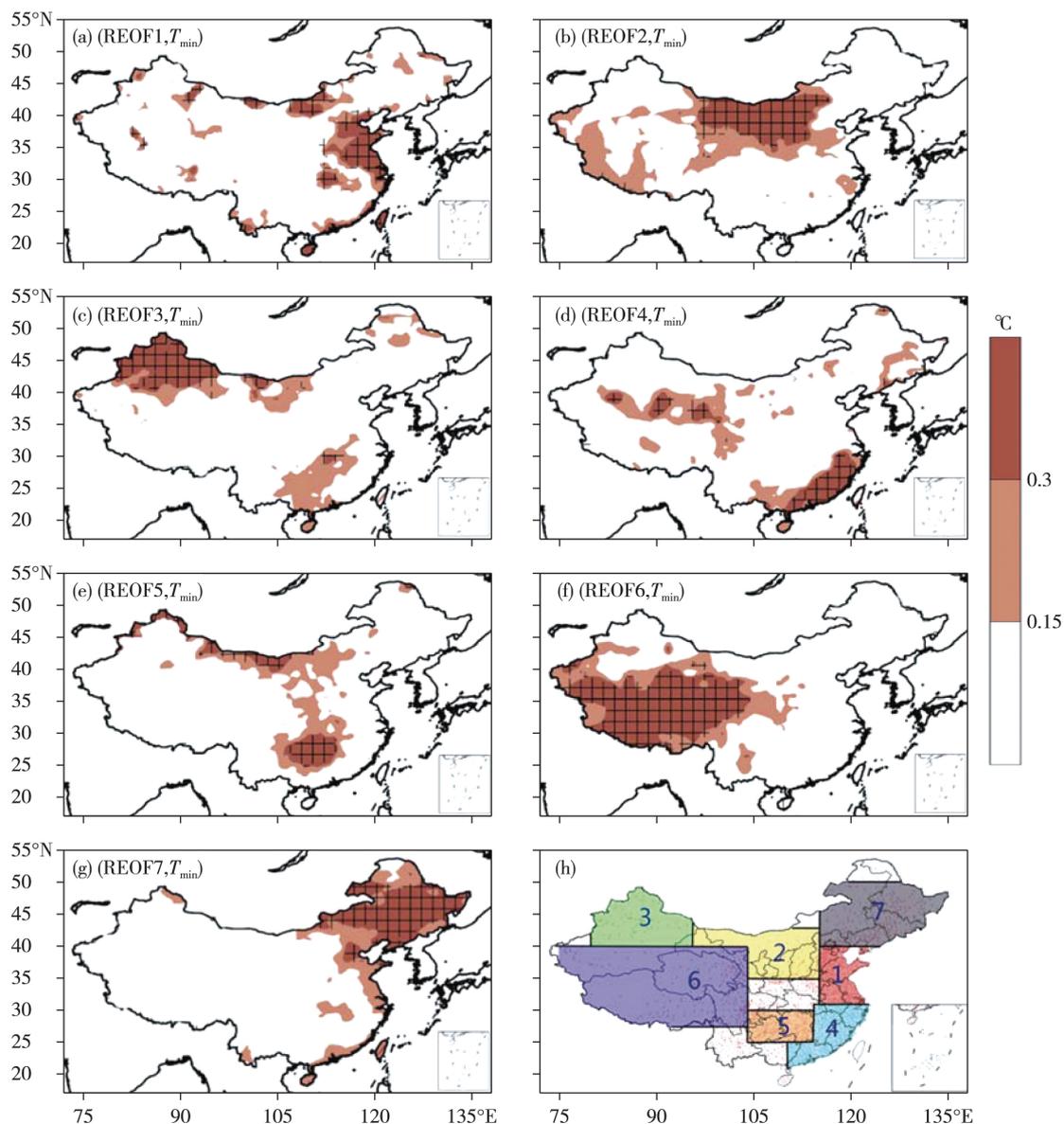


图1 (a—g) 我国大陆冬半年日平均最低气温的前7个 REOF 模态的时间系数序列与冬半年日平均最低温度  $T_{\min}$  的相关系数 (网格表示通过  $\alpha=0.05$  置信水平); (h) 我国 2 434 个站点的地理分布及依据 REOF 前 7 个模态的关于  $T_{\min}$  变率的地理分区

Fig.1 (a-g) Correlations of the time series of coefficients of the seven leading REOF modes with  $T_{\min}$  (values larger than 95% level of confidence are shaded); (h) shown with different colors is for the illustration of the seven sub-regions where scattered spots are geographical locations of 2 434 stations

降温事件。该方法的优点在于充分考虑了降温的地区差异,使得各区域极端降温的阈值都依据本地区情况而定,能够更好反映降温变化的区域性特征。

## 4 极端降温事件变化特征

### 4.1 极端降温事件降温阈值的空间分布

我国冬半年极端降温阈值的空间分布存在显著差异。根据上述定义,图 2a 给出了 1960—2016 年我国冬半年极端降温事件阈值空间分布,由此可见 降温极端事件阈值自北向南减小,且均存在空

间不均匀特别是纬向不均匀的特征。以  $35^{\circ}\text{N}$  为界,北方地区降温阈值普遍大于  $10^{\circ}\text{C}$ ,其中新疆北部、内蒙古和东北大部分地区降温阈值达到  $14^{\circ}\text{C}$ ,塔里木盆地西部存在一相对低值区。南部地区除高原外阈值不超过  $9^{\circ}\text{C}$ ,其中东南沿海、四川盆地及云南大部分地区降温阈值小于  $7^{\circ}\text{C}$ ,华中华东大部分地区阈值趋于一致,分布无明显差异。华南地区阈值相较于华中华东地区略微升高,但沿海地区则存在一低值带。总体看来,降温阈值存在南小北大的空间分布,这与我国气温空间分布特征有一定的一致性。

表 2 7 个地区(P1—P7) 冬半年平均气温与 7 个 REOF 模态(R1—R7) 相应时间系数序列的相关系数

Table 2 Correlations of the winter half year mean  $T_{min}$  in the seven regions (P1-P7) with time series of coefficients of the seven REOF modes (R1-R7)

序列	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
P1	0.76	0.08	0.09	-0.23	-0.16	-0.22	0.48
P2	0.26	0.83	0.05	0.08	0.37	0.09	-0.05
P3	0.09	-0.04	0.93	-0.29	0.36	0	-0.35
P4	0.35	0.02	0.13	0.74	-0.24	-0.19	0.27
P5	-0.36	0.07	0.3	-0.12	0.70	0.01	-0.19
P6	-0.38	0.21	-0.43	0.11	-0.16	0.69	-0.17
P7	0.1	-0.37	-0.04	0.14	-0.24	-0.51	0.71

表 3 我国各区域台站数及极端降温过程降温阈值

Table 3 Number of stations and threshold for extreme cooling events in different sub-regions of China

区域	台站数	极端降温事件阈值/°C
Region 1	378	-8.2
Region 2	327	-9.5
Region 3	79	-10.2
Region 4	384	-7.9
Region 5	260	-7.6
Region 6	225	-8.7
Region 7	264	-10.6

#### 4.2 极端降温事件发生频数的空间分布

1960—2016 年发生的极端降温事件频数存在空间差异。根据前述定义,图 2b 给出了极端降温事件频数分布,可见,频数分布存在明显的空间差异,即北部频发、南部少发。准葛尔盆地以北、高原中部及青海与四川交界处存在多个极端降温频发中

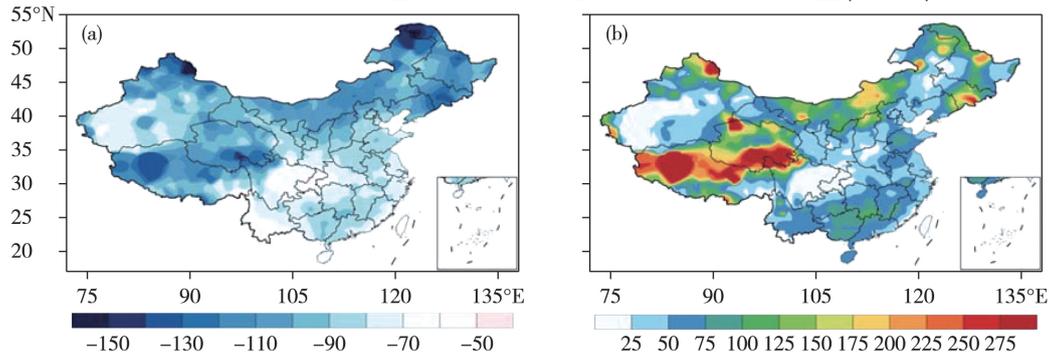


图 2 1960—2015 年我国冬半年极端降温事件阈值空间分布(a, 单位: 0.1 °C) 和发生频数空间分布(b, 单位: 次)

Fig.2 Spatial distribution of threshold (a, unit: 0.1 °C) and frequency(b, unit: times) of extreme cooling events in China during the winter half year of 1960-2015

心,平均发生该事件次数超过 5 次/a。东北平原以东、内蒙古大部分地区、青海北部和新疆北部发生该事件频数相对有所减少,塔里木盆地、东北平原以西部分区域发生该事件频率较低,平均次数低于 1 次/a。具体到南部地区,频数分布亦存在一定南北差异,呈一定的带状分布,华中华东及华南沿海地区发生频率低于 1 次/a。华南中部地区发生频数略有增加,大于 1 次/a。总体看来,极端降温事件发生频数呈带状分布,在 42°N 和 35°N 附近存在两个高频发生带。在 25°N 附近发生该事件的频率亦高于南部其他地区。

#### 4.3 极端降温事件发生频数的时间变化特征

为揭示极端降温事件频数变化的主要特征,对 1960—2015 年我国冬半年极端降温事件发生频数标准化距平场作 EOF 分析。图 3、4 给出了 EOF 第一模态及其时间系数以及对发生频数的 M-K 检验结果。这里的 EOF 第一模态通过 North 检验,其方差贡献率为 15%。全国冬半年极端降温频次标准化距平场第一特征向量(图 3a)除高原西部及东北

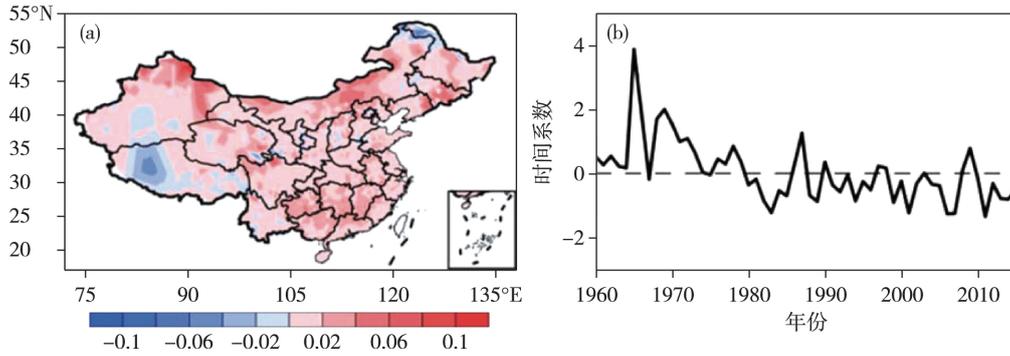


图3 1960—2015年我国冬半年极端降温事件频数 EOF 第一模态(a)及其时间系数(b)

Fig.3 The first leading EOF of CE events ( a) and its time series of coefficients ( PC1 b) during the winter half year of 1960-2015

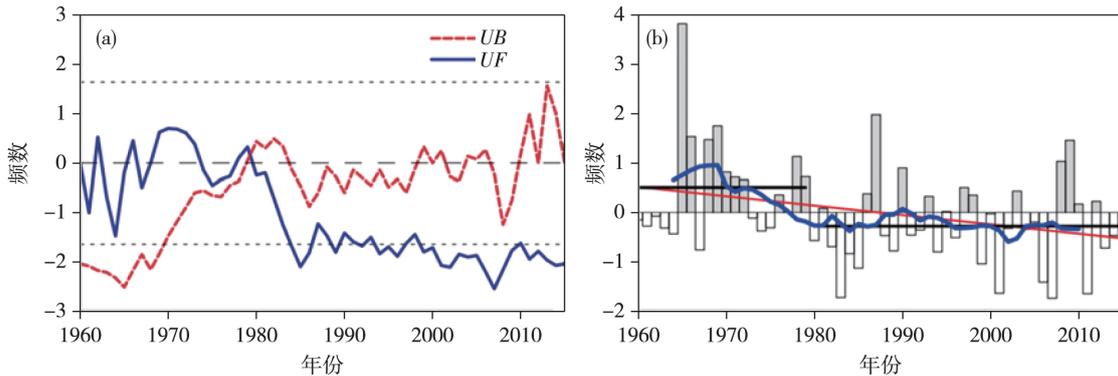


图4 1960—2015年我国冬半年极端降温事件逐年发生频数标准化的 M-K 检验(a)和频数标准化的变化(b) (黑色粗实线: 突变前后频数标准化平均; 红线: 线性趋势; 蓝线: 11 a 滑动平均)

Fig.4 ( a) The normalized M-K test and ( b) variation of CE yearly frequencies during the winter half year of 1960-2015

( black thick lines: standardized mean frequencies before and after mutation; red line: linear regression; blue line: 11-year moving average)

北部外,其余地区普遍为正值,表明我国冬半年该事件的发生具有一定的空间一致性。其时间系数由正到负表明,1960—2015年我国冬半年极端降温事件发生频数总体呈下降趋势。已知全球极端低温事件受全球增暖影响而减少<sup>[23]</sup>,这里讨论的极端降温事件亦可能因全球增暖而减少,或者降温幅度因全球变暖而减弱,上述现象的形成可能与全球气候变暖有着密切的联系。为了检测极端降温事件的突变,对事件逐年发生频数距平标准化后进行了M-K检验(图4a)。由此得出,我国冬半年极端降温事件发生频数在1980年左右存在显著的突变现象。图4b以1980年为界,绘制出该时间前后频数距平标准化后的均值。近五十多年来该事件发生频数持续减少。1980年以前,极端降温事件多发,1980年后显著减少。1960—2015年极端降温事件频数的变化并非一直呈下降趋势,而是存在一定的波动。1970s前呈上升趋势,1970—1982年表现出明显的下降趋势,1980s中期至1990年则略微上升,随后缓慢下降。总体来看,1970s极端降温事件呈显著下降趋势,最明显的减少发生在突变年前后,

1990s中期以后,变化趋于平稳,无显著的下降趋势。

#### 4.4 极端降温事件各年代发生频数和趋势的空间分布

图5为我国冬半年极端降温事件各年代频数和趋势的空间分布,可以看出,各年代频数分布均存在明显的空间差异,但总体特征基本一致,均呈北部频发、南部少发格局。

具体到不同年代,1960—1969年(图5a),我国西北部及内蒙古东北部部分地区趋势为正值,表明上述地区在所处时段内发生频数呈上升趋势,其余地区频数变化并不显著。1970—1979年(图5b),正值区范围增大,与图5a相比,我国北方地区及南方部分地区事件发生频数呈上升趋势。1980—1989年(图5c),我国中东部出现增长趋势,北部及南部地区正值区范围减小,趋势正值区较之前相比有所减少。1990—1999年(图5d),全国频数趋势空间格局较之30a发生转变,大部分地区表现为南正北负的空间格局,但频数变化较之前相比无明显差别。2000—2009年(图5e),正值区范围缩小,除高

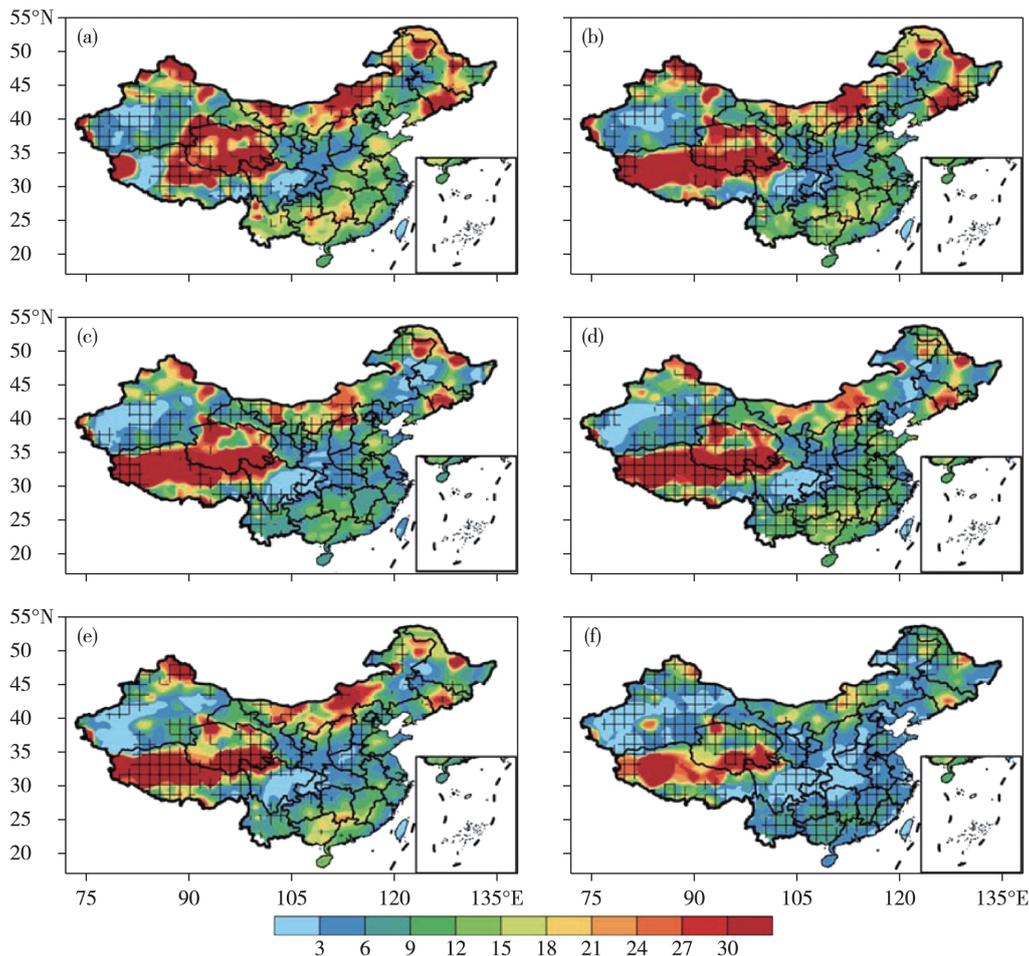


图 5 1960—2015 年我国极端降温事件各年代发生频数(阴影)和趋势(网格线区表示趋势为正)的空间分布:  
 (a) 1960—1969 年; (b) 1970—1979 年; (c) 1980—1989 年; (d) 1990—1999 年; (e) 2000—2009 年; (f) 2010—2015 年  
 Fig.5 Spatial distribution of frequency( shading) and trends ( grid line areas indicate positive trend) in CE occurrences in China during 1960-2015  
 for the periods of ( a) 1960-1969 ( b) 1970-1979 ( c) 1980-1989 ( d) 1990-1999 ( e) 2000-2009 and ( f) 2010-2015

原地区、新疆北部地区外,其余普遍出现负增长。2010—2015 年(图 5f)除高原地区外,大部分地区表现出显著增长的趋势。

综上所述,1960—2015 年期间,极端降温事件各年代频数的空间分布特征基本一致,而在不同年代趋势呈现出不同的特征。前期总体呈现出北部增长的空间格局,1990s 转变为南负北正的空间分布,后期中部及沿海地区发生了趋势符号的年代际改变。

#### 4.5 我国各区域冬半年极端降温频数的变化特征

各区域极端降温事件的发生频数均存在年际、年代际变化(图 6),且存在突变现象。对 7 个区域 1960—2015 年冬半年极端降温事件频数分别进行了 M-K 检验(图略),除华北西北和华南西南地区外,其余 5 个地区极端降温频数均发生了明显突变,但各区域突变年份发生时间并不相同。根据各区

域频数变化特征及突变分析得到表 4,可见近 56 a 来各区域冬半年发生极端降温事件频数的最多年份除华北地区外均保持大体一致,集中在 1960s 中期。除华东地区外,其余地区事件 1 a 发生频数均超过两次,其中华中地区发生频数最多,1 a 事件发生次数超过三次。与各区域事件发生最多年份不同,事件发生最少年份各不相同,在最少年份各区域事件发生次数全部低于 1 次/a。

我国各区域冬半年极端降温事件频数区域平均的变化及其突变前后的均值由图 6 所示。可以看出,各区域突变发生后的均值小于突变发生前,且突变前后各区域极端降温事件频数并非一直呈下降趋势,而是呈现波动变化状态。结合图 6 和表 4 可以发现,Region 1 在突变发生前频数表现出先增长后减小的特征,1968 年达到频数的最大值,该段时期事件平均频数为 1.1 次/a,突变后事件平均频数变为 0.8 次/a,频数变化在突变发生阶段趋于平

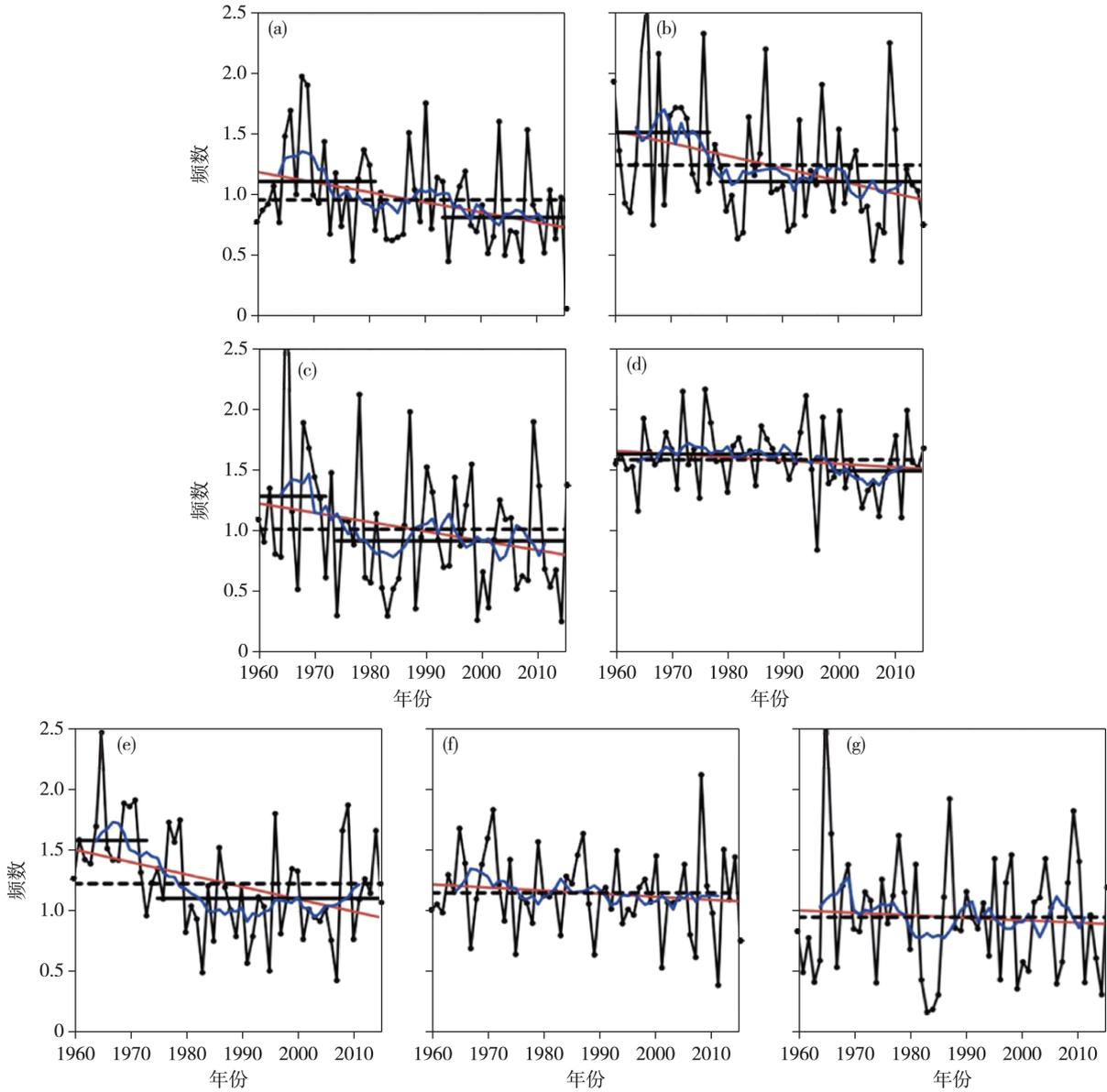


图 6 我国各区域冬半年极端降温事件频数区域平均的变化 (单位: 次) :

( a ) Region 1; ( b ) Region 3; ( c ) Region 5; ( d ) Region 6; ( e ) Region 7; ( f ) Region 2; ( g ) Region 4

( 黑色粗虚线: 频数均值; 黑色粗实线: 突变前后频数均值; 红线: 线性趋势; 蓝线: 11 a 滑动平均)

Fig.6 Variations of frequency of CE events in different regions of China in winter half year averaged over times in:

( a ) Region 1; ( b ) Region 3; ( c ) Region 5; ( d ) Region 6; ( e ) Region 7; ( f ) Region 2; ( g ) Region 4 ( Black dotted line:

mean frequency ; black rough line: mean frequency before and after mutation; red line: linear regression; blue line: 11-year moving average)

缓,呈波动变化,突变前后均显示出一定减少趋势。Region 3 频数的变化与华东地区大致相似,其在突变前后期频数的变率与 Region 1 相比有所增大,突变前事件平均频数为 1.5 次/a,突变后变为 1.1 次/a,突变后期频数的变率与华东地区同时期比较来看,其变化趋势更小,更加趋于稳定。Region 5 突变前频数变化大体表现出小幅增大的趋势,突变发生前后,频数变率相比前几个区域显著,平均频数由突变前的 1.3 次/a 变为突变后的 0.9 次/a,突变发生后,频数的变化与其余几个地区相比浮动更

大。Region 6 突变发生的时间最晚(1995—1998 年)频数在突变发生前趋于稳定,无明显变化趋势,1990s 至 2000s 初期,频数表现出一定的下降趋势,突变发生前后平均频数无明显变化,近 10 a 来,频数又有一定的升高趋势。Region 7 在 1960s 中期至突变发生前期,极端降温事件频数呈现显著的下降趋势,突变前发生事件平均频数达到 1.6 次/a,突变发生后,事件平均频数下降为 1.1 次/a,且突变后极端降温事件频数的变率明显没有突变前高,该区域频数的变化在 1980s/1990s 趋于平缓,进入 2000s

表 4 中国各区域冬半年极端降温事件频数特征

Table 4 Frequencies of CE events in different regions of China in winter half year

区域	最多年份	最多年频数	最少年份	最少年频数	突变年份	突变前平均频数	突变后平均频数
Region 1	1968 年	2	2007 年	0.1	1983—1993 年	1.1	0.8
Region 2	2008 年	2.1	2011 年	0.4			
Region 3	1966 年	2.5	2011 年	0.4	1979 年	1.5	1.1
Region 4	1965 年	2.8	1983 年	0.2			
Region 5	1965 年	3.2	2014 年	0.3	1974 年	1.3	0.9
Region 6	1976 年	2.2	1996 年	0.8	1995—1998 年	1.6	1.5
Region 7	1965 年	2.5	2007 年	0.4	1975 年	1.6	1.1

以来,频数的变化呈现出增长的趋势。Region 2 与 Region 4 频数减小趋势较上述区域趋于平稳,但均呈现缓慢波动减小特征。

综上所述,我国南方区域冬半年极端降温事件频数变化在其各自突变年前后发生明显减小,突变前的均值明显大于突变后。近年来,各区域极端降温频数趋于稳定,变率较突变发生前后减小。

## 5 结论

通过对冬半年平均日最低气温的 REOF 分析,可将我国大陆分为 7 个区域,通过对每个区域内所有站点降温阈值进行平均,得到了 7 个降温阈值。当某区域内测站单日降温幅度超过区域平均阈值时,被定义为该测站发生一次极端降温事件。

极端降温在 7 个区域的阈值分别为  $-8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-7.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-7.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-10.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。我国冬半年极端降温事件频数分布存在显著的空间差异,呈现北部频发、南部少发的空间格局。北部地区存在多个频发中心,在  $42^{\circ}\text{N}$  和  $35^{\circ}\text{N}$  附近存在两个高频发生带。南部地区频数分布亦存在南北差异,呈现一定的带状分布,在  $25^{\circ}\text{N}$  附近发生该事件的频率亦高于南部其他地区。近 56 a 来,极端降温事件频数的变化并非表现出一直下降的趋势,而是呈现出年际和年代际波动状态。1970s 极端降温事件存在显著的下降趋势,最明显的减小发生在突变年前后,1990s 中期以后,变化趋于平稳。极端降温事件各年代频数的空间分布基本一致,趋势变化则呈现出不同特征,前期总体呈现出北部增长的空间格局,1990s 转变为南负北正的空间分布,后期中部及沿海地区发生了趋势符号的年代际改变。

我国南方区域冬半年极端降温事件频数变化

在其各自突变年前后发生了明显的突变减小,突变前的均值明显大于突变后的均值,中纬度地区突变前后的变化则不显著;近年来,各区域极端降温频数趋于稳定,变率较突变发生前明显减小。各区域突变点时间存在先后差异,1974—1998 年,发生突变的区域依次为华北、东北、新疆北部、华东和高原地区。

要说明的是,本文仅用统计的方法探讨了冬半年极端降温事件的时空变化特征,但对其成因如环流变化、外强迫影响等<sup>[35-44]</sup>暂未进行,有待未来深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] IPCC. Climate change 2001: synthesis report. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 373.
- [2] ZHANG Zongjie, QIAN Weihong. Identifying regional prolonged low temperature events in China. Adv. Atmos. Sci., 2011, 28 (2): 338-351.
- [3] REN Fumin, CUI Donglin, GONG Zhiqiang, et al. An objective identification technique for regional extreme events. J. Climate, 2012, 25(20): 7015-7027.
- [4] 陶诗言,卫捷. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 337-350.  
TAO Shiyan, WEI Jie. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2008, 13(4): 337-350.
- [5] 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系. 气象学报, 2008, 66(5): 808-825.  
DING Yihui, WANG Zunya, SONG Yafang, et al. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2008, 66(5): 808-825.
- [6] ZHOU Wen, Chan J C L, CHEN Wen, et al. Synoptic-scale controls of persistent low temperature and icy weather over southern

- China in January 2008. *Mon. Wea. Rev.*, 2009, 137( 11 ): 3978-3991.
- [7] 沈柏竹, 刘实, 廉毅, 等. 2009 年中国东北夏季低温及其与前期海气系统变化的联系. *气象学报*, 2011, 69( 2 ): 320-333.  
SHEN Baizhu, LIU Shi, LIAN Yi, et al. An investigation into 2009 summer low temperature in Northeast China and its association with prophase changes of the air-sea system. *Acta Meteorologica Sinica* ( in Chinese ), 2011, 69( 2 ): 320-333.
- [8] 王晓娟, 龚志强, 任福民, 等. 1960—2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征. *气候变化研究进展*, 2012, 8( 1 ): 8-15.  
WANG Xiaojuan, GONG Zhiqiang, REN Fumin, et al. Spatial/temporal characteristics of China regional extreme low temperature events in winter during 1960-2009. *Advances in Climate Change Research* ( in Chinese ), 2012, 8( 1 ): 8-15.
- [9] Plummer N, Salinger M J, Nicholls N, et al. Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century. *Climatic Change*, 1999, 42( 1 ): 183-202.
- [10] Bonsal B R, ZHANG Xuebin, Vincent L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. *J. Climate*, 2001, 14( 9 ): 1959-1976.
- [11] De Gaetano A T, Allen R J. Trends in twentieth-century temperature extremes across the United States. *J. Climate*, 2002, 15( 22 ): 3188-3205.
- [12] Vincent L A, Peterson T C, Barros V R, et al. Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. *J. Climate*, 2005, 18( 23 ): 5011-5023.
- [13] 罗梦森, 熊世为, 梁宇飞. 区域极端降水事件阈值计算方法比较分析. *气象科学*, 2013, 33( 5 ): 549-554.  
LUO Mengsen, XIONG Shiwei, LIANG Yufei. Comparative study of calculated threshold values in regional extreme precipitation. *Journal of the Meteorological Sciences* ( in Chinese ), 2013, 33( 5 ): 549-554.
- [14] 潘晓华, 翟盘茂. 气温极端值的选取与分析. *气象*, 2002, 28( 10 ): 28-31.  
PAN Xiaohua, ZHAI Panmao. Analysis of surface air temperature extremum. *Meteorological Monthly* ( in Chinese ), 2002, 28( 10 ): 28-31.
- [15] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 a 温度和降水极端事件变化. *地理学报*, 2003, 58( S1 ): 1-10.  
ZHAI Panmao, PAN Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica* ( in Chinese ), 2003, 58( S1 ): 1-10.
- [16] 任福民, Gleason B, Easterling D. 一种识别热带气旋降水的数值方法. *热带气象学报*, 2001, 17( 3 ): 308-313.  
REN Fumin, Gleason B, Easterling D. A numerical technique for partitioning cyclone tropical precipitation. *Journal of Tropical Meteorology* ( in Chinese ), 2001, 17( 3 ): 308-313.
- [17] 况雪源, 王遵娅, 张耀存, 等. 中国近 50 a 来群发性高温事件的识别及统计特征. *地球物理学报*, 2014, 57( 6 ): 1782-1791.  
KUANG Xueyuan, WANG Zunya, ZHANG Yaocun, et al. Identification and statistical characteristics of the cluster high temperature events during last fifty years. *Chinese Journal of Geophysics* ( in Chinese ), 2014, 57( 6 ): 1782-1791.
- [18] 龚志强, 王晓娟, 崔冬林, 等. 区域性极端低温事件的识别及其变化特征. *应用气象学报*, 2012, 23( 2 ): 195-204.  
GONG Zhiqiang, WANG Xiaojuan, CUI Donglin, et al. The identification and changing characteristics of regional low temperature extreme events. *Journal of Applied Meteorological Science* ( in Chinese ), 2012, 23( 2 ): 195-204.
- [19] 张宁, 孙照渤, 曾刚. 1955—2005 年中国极端气温的变化. *南京气象学院学报*, 2008, 31( 1 ): 123-128.  
ZHANG Ning, SUN Zhaobo, ZENG Gang. Change of extreme temperatures in china during 1955-2005. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* ( in Chinese ), 2008, 31( 1 ): 123-128.
- [20] 付冬雪, 孙照渤, 李忠贤, 等. 1955—2006 冬半年中国极端低温的时空变化特征. *气象科学*, 2011, 31( 3 ): 274-281.  
FU Dongxue, SUN Zhaobo, LI Zhongxian, et al. Spatial and temporal features of China extreme minimum temperature in winter half year during 1955-2006. *Journal of the Meteorological Sciences* ( in Chinese ), 2011, 31( 3 ): 274-281.
- [21] 潘敖大, 范苏丹, 陈海山. 江苏省近 45 a 极端气候的变化特征. *气象科学*, 2010, 30( 1 ): 87-92.  
PAN Aoda, FAN Sudan, CHEN Haishan. Characteristic of extreme climate change over Jiangsu Province in the last 45 a. *Scientia Meteorologica Sinica* ( in Chinese ), 2010, 30( 1 ): 87-92.
- [22] 张霏燕, 徐海明. 东北春季极端低温的变化特征及其与大西洋海温的关系. *大气科学学报*, 2011, 34( 5 ): 574-582.  
ZHANG Feiyan, XU Haiming. Spatial/temporal variations of spring extreme low temperature in Northeast China and its relationship with SSTA in Atlantic Ocean. *Transactions of Atmospheric Sciences* ( in Chinese ), 2011, 34( 5 ): 574-582.
- [23] 任福民, 翟盘茂. 1951—1990 年中国极端气温变化分析. *大气科学*, 1998, 22( 2 ): 217-227.  
REN Fumin, ZHAI Panmao. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951-1990. *Scientia Atmospherica Sinica* ( in Chinese ), 1998, 22( 2 ): 217-227.
- [24] 陈海山, 刘蕾, 朱月佳. 中国冬季极端低温事件与天气尺度瞬变波的可能联系. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42( 12 ): 1951-1965.  
CHEN Haishan, LIU Lei, ZHU Yuejia. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity. *Science China Earth Sciences* ( in Chinese ), 2012, 56( 7 ): 1266-1280.
- [25] 黄菲, 胡蓓蓓, 周晓, 等. 中国冬季极端低温事件的多尺度特征. *中国海洋大学学报*, 2014, 44( 10 ): 42-50.  
HUANG Fei, HU Beibei, ZHOU Xiao, et al. Multi-scale variations of winter extreme minimum temperature in China. *Periodical of Ocean University of China* ( in Chinese ), 2014, 44( 10 ): 42-50.
- [26] ZHANG Yi, Sperber K R, Boyle J S. Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: results from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, 1997, 125( 10 ): 2605-2619.

- [27] 王遵娅,丁一汇. 近 53 a 中国寒潮的变化特征及其可能原因. 大气科学, 2006, 30(6): 1068-1076.  
WANG Zunya, DING Yihui. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2006, 30(6): 1068-1076.
- [28] 黄荣辉,周连童. 我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 1-9.  
HUANG Ronghui, ZHOU Liantong. Research on the characteristics, formation mechanism and prediction of severe climatic disasters in China. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 2002, 11(1): 1-9.
- [29] 魏凤英. 气候变暖背景下我国寒潮灾害的变化特征. 自然科学进展, 2008, 18(3): 289-295.  
WEI Fengying. Characteristics of cold surge disaster in China under the background of climate warming. Progress in Natural Science (in Chinese), 2008, 18(3): 289-295.
- [30] 钱维宏,张玮玮. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖. 大气科学, 2007, 31(6): 1266-1278.  
QIAN Weihong, ZHANG Weiwei. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2007, 31(6): 1266-1278.
- [31] Lorenz E N. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology Department of Meteorology, 1956: 1-49.
- [32] 黄嘉佑. 转动主分量分析在天气气候分析中的应用. 气象, 1988, 14(9): 49-51.  
HUANG Jiayou. The application of rotational principal component analysis in weather and climate analysis. Meteorological Monthly (in Chinese), 1988, 14(9): 49-51.
- [33] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. Mon. Wea. Rev., 1982, 110(7): 699-706.
- [34] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. J. Hydrol., 1998, 204(1/2/3/4): 182-196.
- [35] CAI Jiayi, GUAN Zhaoyong, MA Fenhua. Possible combined influences of absorbing aerosols and anomalous atmospheric circulation on summertime diurnal temperature range variation over the middle and lower reaches of the Yangtze River. J. Meteor. Res., 2016, 30(6): 927-943.
- [36] 陈明轩,管兆勇,徐海明. 冬春季格陵兰海冰变化与初夏中国气温/降水关系的初步分析. 高原气象, 2003, 22(1): 7-13.  
CHEN Mingxuan, GUAN Zhaoyong, XU Haiming. A simple study on relation of winter-spring Greenland sea ice change with air temperature/precipitation in early summer of China. Plateau Meteorology (in Chinese), 2003, 22(1): 7-13.
- [37] 胡潮,卢楚翰,管兆勇,等. 9 个 CMIP5 模式模拟的大气质量海陆间迁移的季节循环. 大气科学学报, 2015, 38(5): 588-598.  
HU Chao, LU Chuhan, GUAN Zhaoyong, et al. Seasonal cycle of atmospheric mass migrations between continents and oceans simulated by nine CMIP5 models. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2015, 38(5): 588-598.
- [38] 胡潮,管兆勇,李明刚. 北半球大洋与大陆区域间大气质量分布的季节循环. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(7): 1519-1531.  
HU Chao, GUAN Zhaoyong, LI Minggang. The seasonal cycle of redistribution of atmospheric mass between continent and ocean in the Northern Hemisphere. Science China Earth Sciences (in Chinese), 2014, 57(7): 1501-1512.
- [39] 卢楚翰,黄露,何金海,等. 西太平洋暖池热含量年际变化及其对东亚气候异常的影响. 热带气象学报, 2014, 30(1): 64-72.  
LU Chuhan, HUANG Lu, HE Jinhai, et al. Interannual variability of heat content in western Pacific warm pool and its impact on the Eastern Asian climatic anomaly. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 2014, 30(1): 64-72.
- [40] 马奋华,管兆勇. 中国东部地区冬季 AOD 分布特征及与冬季风环流的可能联系. 大气科学学报, 2019, 42(2): 255-266.  
MA Fenhua, GUAN Zhaoyong. Features of AOD at different levels in eastern China in association with East Asian winter monsoon. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2019, 42(2): 255-266.
- [41] 周游,管兆勇,张茜,等. 秋季大气质量海陆间迁移与南北涛动年际变化不同位相配置及其对中国气温异常的影响. 气象学报, 2016, 74(3): 367-379.  
ZHOU You, GUAN Zhaoyong, ZHANG Qian, et al. Circulation anomalies and their impacts on autumn temperature variations over China in association with different phase combinations of atmospheric mass migration between lands and oceans and inter-hemispheric oscillations. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2016, 74(3): 367-379.
- [42] ZHANG Qian, GUAN Zhaoyong, LI Minggang. The Eurasia-North Pacific Oscillation in atmospheric mass variations independent of both IHO and AO and its possible impacts on winter climate. Climate Dyn., 2018, 50(11/12): 4303-4322.
- [43] 解小寒,杨修群. 冬季北极海冰面积异常与中国气温变化之间的年际关系. 南京大学学报(自然科学), 2006, 42(6): 549-561.  
XIE Xiaohan, YANG Xiuqun. Interannual relationship between Arctic sea ice concentration anomaly and China air temperature variation during winter. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 2006, 42(6): 549-561.
- [44] LIU Chao, HU Haibo, ZHANG Yuan, et al. The direct effects of aerosols and decadal variation of global sea surface temperature on the East Asian summer precipitation in CAM3.0. J. Trop. Meteor., 2017, 23(2): 217-228.